

w 985

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-22776

(P2003-22776A)

(43) 公開日 平成15年1月24日 (2003.1.24)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テークコード\* (参考)

H 0 1 J 37/305

H 0 1 J 37/305

A 2 G 0 5 2

G 0 1 N 1/28

37/30

A 5 C 0 3 4

H 0 1 J 37/30

G 0 1 N 1/28

G

F

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号

特願2001-204768(P2001-204768)

(22) 出願日

平成13年7月5日 (2001.7.5)

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 富松 聡

東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地

株式会社日立製作所中央研究所内

(72) 発明者 小池 英巳

茨城県ひたちなか市市毛882番地 株式会

社日立製作所計測器グループ内

(74) 代理人 100068504

弁理士 小川 勝男 (外2名)

最終頁に続く

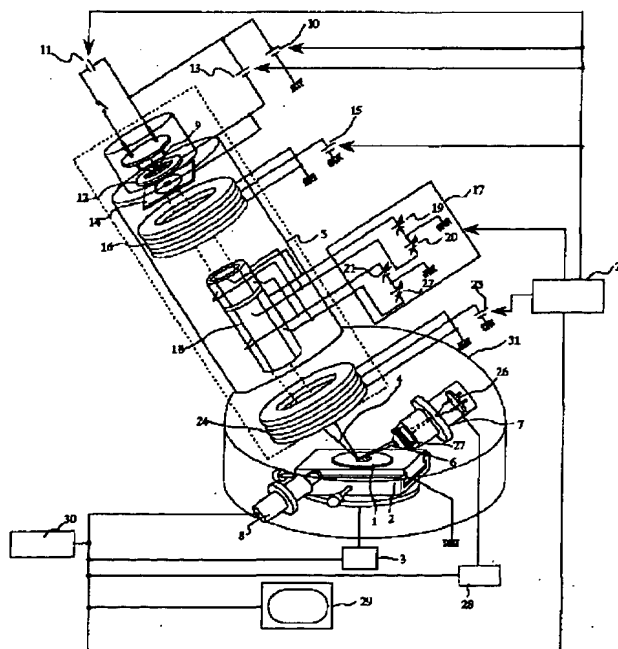
(54) 【発明の名称】 試料作製装置および試料作製方法

(57) 【要約】

【課題】 非傾斜試料台でのイオンビーム加工において、任意の角度で断面加工可能な試料作製装置および作製方法を実現する。

【解決手段】 イオン源9から放出されるイオンビーム4を集束し、走査、偏向するイオンビーム光学系5を用いて、イオンビーム加工により試料台2に保持された試料1に試料断面を形成するよう構成した試料作製装置において、イオンビーム光学系5のイオンビーム光軸と試料台2面とのなす角度を固定とし、かつ、試料台2の試料台面内での回転により、試料断面の形成を制御してなるよう構成する。装置製造コストの低減に有効な非傾斜試料台による装置構成で、任意の角度でのイオンビーム照射加工が可能となり、精度良い断面が形成できる。

図1



**【特許請求の範囲】**

【請求項1】荷電粒子源から放出される荷電粒子ビームを集束し、走査、偏向する荷電粒子ビーム光学系を用いて、荷電粒子ビーム加工により試料台に保持された試料に試料断面を形成するよう構成した試料作製装置において、前記荷電粒子ビーム光学系の荷電粒子ビーム光軸と前記試料台面とのなす角度を固定とし、かつ、前記試料台の試料台面内での回転により、前記試料断面の形成を制御してなることを特徴とする試料作製装置。

【請求項2】荷電粒子源から放出される荷電粒子ビームを集束し、走査・偏向する荷電粒子ビーム光学系を用いて、荷電粒子ビーム加工により試料台に載置された試料に試料断面を形成する試料作製装置において、前記荷電粒子ビーム光学系の荷電粒子ビーム光軸と前記試料表面とのなす角度を固定とし、前記試料の観察を所望する試料断面を形成するために設定した設定断面の法線方向と前記試料表面のなす角度に対応して、前記荷電粒子ビーム光学系の走査、偏向を制御するよう構成したことを特徴とする試料作製装置。

【請求項3】イオン源と、前記イオン源から放出するイオンを集束するレンズと、偏向器から構成されるイオンビーム光学系と、前記イオンビーム光学系を制御するイオンビーム光学系制御装置と、イオンビームを試料に照射した際に発生する前記試料からの2次粒子を検出するための検出器と、前記試料を保持する試料台と、前記試料台の位置を制御する試料位置制御装置とを備え、イオンビーム加工により前記試料に試料断面を形成する試料作製装置において、前記イオンビーム光学系のイオンビーム光軸と前記試料表面とのなす角度が固定されており、かつ、前記試料の観察を所望する試料断面を形成するために設定した設定断面の法線方向と前記試料表面のなす設定断面俯角に対応して、前記試料断面の形成を制御するよう構成したことを特徴とする試料作製装置。

【請求項4】イオン源と、前記イオン源から放出するイオンを集束するレンズと、偏向器とを有するイオンビーム光学系と、前記イオンビーム光学系を制御するイオンビーム光学系制御装置と、前記イオンビームを試料に照射した際に発生する前記試料からの2次粒子を検出するための検出器と、前記試料を保持する試料台と、前記試料台の位置を制御する試料位置制御装置とを備え、イオンビーム加工により前記試料に試料断面を形成する試料作製装置において、前記イオンビーム光学系制御装置を、前記イオンビーム光学系のイオンビーム光軸と試料表面のなす角度が $0^{\circ}$ より大きく $90^{\circ}$ 未満であり、かつ、前記試料の観察を所望する試料断面を形成するために設定した設定断面の法線方向と前記試料表面のなす設定断面俯角に対応して、前記偏向器によるイオンビーム走査を制御するよう構成したことを特徴とする試料作製装置。

【請求項5】前記イオンビーム光学系制御装置が、前記

イオンビーム光軸を法線とする面に前記設定断面俯角を投影した角度情報をもとに前記偏向器を制御することを特徴とする請求項3又は4記載の試料作製装置。

【請求項6】前記イオンビーム光学系制御装置が、前記イオンビーム光軸を法線とする面に前記設定断面俯角を投影した角度情報をもとに前記偏向器を制御し、前記試料位置制御装置が前記試料台の試料台面内での回転を制御することを特徴とする請求項3又は4記載の試料作製装置。

【請求項7】前記設定断面俯角をイオンビーム光軸を法線とする面に投影した角度情報を、前記2次粒子検出器による2次粒子情報を表示する表示装置上に表示するよう構成したことを特徴とする請求項3又は4記載の試料作製装置。

【請求項8】イオンビーム光学系を介してイオンビームを試料に傾斜方向から照射して、スパッタリング加工により前記試料に試料断面を形成する試料作製方法において、前記試料の観察を所望する試料断面の俯角を設定する工程と、前記試料上に、前記俯角に対応してイオンビームの偏向走査領域を形成する一辺を決定し、偏向走査領域を設定する工程と、前記偏向走査領域をイオンビーム加工する工程とを有することを特徴とする試料作製方法。

【請求項9】前記試料の所望する試料断面の、前記イオンビーム光学系のイオンビーム光軸を前記試料面上に投影した光軸投影線に対する回転角を取得する工程と、前記俯角と前記所望断面の回転角とに対応して試料回転角を決定し、前記試料台の試料台面内での回転を設定する工程を有することを特徴とする請求項8記載の試料作製方法。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

【発明の属する技術分野】本発明は、試料作製技術に係り、特に、イオンビームを試料に照射して、断面加工、観察を行う試料作製装置および方法に関する。

**【0002】**

【従来の技術】ダイナミックランダムアクセスメモリ（DRAM）に代表される半導体メモリやマイクロプロセッサ、半導体レーザなど半導体デバイス、および磁気ヘッドなど電子部品の製造においては、製品の品質管理のために製造工程途中あるいは終了の段階で製品特性が検査される。検査では、製作寸法の計測や、回路パターンの欠陥検査や異物分析がなされる。このため、各種の手段が用意され利用されている。特に異常箇所が製品の内部に存在する場合は、特定位置の試料断面観察が必要であり、この観察断面形成には集束イオンビーム加工装置（FIB装置）が広く利用されている。

【0003】この手法では、試料表面へのイオンビーム照射によるスパッタリングを利用して穴を形成して、その形成断面をFIB装置や走査電子顕微鏡（SEM）で

観察していた。このとき、断面はイオンビーム走査範囲の端部に形成されている。

【0004】しかし、実際の形成断面は、加工ビームのフレアやスパッタ物質の再付着（以下、リデポと称す。）により試料表面に対して完全に垂直ではなく、微小な傾斜（テーパ）が存在する。試料台に傾斜機構を有するFIB装置であれば、テーパに相当する角度、例えば0.5度程度試料を傾斜させてイオンビーム照射することにより、テーパを除去して、より垂直度の高い観察断面を形成することが可能であった。この手法に関しては、例えば、透過電子顕微鏡（TEM）の試料断面加工として、「電子・イオンビームハンドブック第3版」（日本学術振興会第132委員会編、日刊工業新聞社、459頁～460頁）に記載されている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】試料台に傾斜機構を有するFIB装置であれば、任意角度でのFIB照射が可能であり、前述の様にテーパ除去加工も可能である。

【0006】しかし、近年の半導体デバイス検査では、ウェーハの大口径化が進み、これに対応する試料台も大型化している。大型試料台を精度よく傾斜させるには時間を要し、結果的に試料作製時間が長くなってしまう問題があった。また、試料台自体の大重量のために傾斜前後でユーセントリックが保たれずにFIB光学系に対する試料位置が移動してしまうため、FIBの焦点が試料表面から比較的大きくはずれ、試料表面が観察できなくなり、FIB光学系の再調整を余儀なくされる問題も発生する。

【0007】また、試料台の傾斜機能は試料台そのものと、試料台を内包する試料室を大型化させる原因である。昨今の潮流は、ウェーハ直径が200mmから300mmに移行しているところで、さらに400mmに進展すれば、試料台の大型化は余儀なくされ、上述のような試料台傾斜に伴う問題の解決を避けては通れなくなる。

【0008】これに対し、装置の試料台に傾斜機能を省略できれば、装置全体の小型化が実現し試料傾斜に伴う試料位置のズレなどの問題は解決するが、従来の手法では任意角度のFIB照射が困難であった。試料表面に対してイオンビームを傾斜照射して加工穴を作製し観察断面を形成可能な方法について、特開平3-166744号公報「断面観察方法」に開示されているが、この方法では垂直断面加工について記載されているが、試料台傾斜無しに照射角を任意に変更する手法については記載されていない。このため、上記のテーパ除去加工も困難であった。

【0009】なお、ここで試料台の傾斜とは、試料台面内に含まれる線分もしくは平行な線分を軸として、試料台を回転することとし、以降、試料台の傾斜と記述する。

【0010】本発明は、上述の問題点に鑑み、非傾斜試料台においても、ある範囲内の任意の角度でFIB照射による断面形成が可能な試料作製装置、並びに試料作製方法を実現することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】はじめに、本明細書で使用する語句を、以下の通り定義する。

【0012】所望断面とは、装置操作者が形成しようとする断面である。設定断面とは、設定したイオンビーム走査領域がビーム径やリデポの影響無く理想的に加工されると仮定した断面である。形成断面とは、実際にFIB加工で形成される断面である。形成断面稜とは、形成断面と試料表面が成す交線である。設定断面稜とは、設定断面と試料表面が成す交線である。偏向走査領域端とは、イオンビーム走査領域を形成する1辺である。所望断面稜とは、所望断面と試料表面が成す交線である。所望断面稜法線方向とは、所望断面稜の試料表面内の法線で試料から加工空間へ向かう方向である。所望断面法線方向とは、所望断面の法線で試料内部から加工空間へ向かう方向である。所望俯角とは、所望断面法線方向と試料表面の成す角であり、所望断面法線方向が試料表面上から試料内部へ向かう場合を正、試料内部から試料表面上へ向かう場合（仰角に相当）を負とする。設定断面俯角とは、設定断面法線方向と試料表面のなす角であり、設定断面法線方向が試料表面上から試料内部へ向かう場合を正、試料内部から試料表面上へ向かう場合（仰角に相当）を負とする。

【0013】上記目的を達成する手段として、以下のものを上げる。

（1）イオン源と、イオン源から放出するイオンを集束するレンズと、偏向器から構成されるイオンビーム光学系と、イオンビーム光学系を制御するイオンビーム光学系制御装置と、イオンビームを試料に照射した際に発生する試料からの2次粒子を検出するための検出器と、試料を保持する試料台と、試料台の位置を制御する試料位置制御装置を備え、イオンビーム加工により試料に試料断面を形成する試料作製装置において、上記イオンビーム光学系のイオンビーム光軸と試料表面の成す角度が固定されており、設定断面俯角に対応して、試料断面の形成を制御するよう構成した。これにより、イオンビーム光学系に対して試料台の傾斜を変更できない装置においても、任意の傾斜角の断面を形成することが可能となる。

（2）イオン源と、イオン源から放出するイオンを集束するレンズと、偏向器から構成されるイオンビーム光学系と、イオンビーム光学系を制御するイオンビーム光学系制御装置と、イオンビームを試料に照射した際に発生する試料からの2次粒子を検出するための検出器と、試料を保持する試料台と、試料台の位置を制御する試料位置制御装置を備え、イオンビーム加工により試料に試

料断面を形成する試料作製装置において、イオンビーム光学系制御装置が、イオンビーム光学系のイオンビーム光軸と試料表面の成す角度が $0^{\circ}$ より大きく $90^{\circ}$ 未満であり、設定断面の設定断面俯角に対応して、偏向器によるイオンビーム走査を制御する構成とした。これにより、断面加工時のFIB照射角度を任意に設定することができる。

(3) 上記(1)、(2)の試料作製装置において、イオンビーム光学系制御装置が、設定断面の設定断面俯角に対応して、イオンビーム光軸を法線とする面に所望俯角を投影した角度情報をもとに上記偏向器を制御する構成とした。これにより、イオンビーム加工設定角度を制御し、断面加工時のFIB照射角度を任意に設定することができる。

(4) 上記(1)、(2)の試料作製装置において、イオンビーム光学系制御装置が、設定断面の設定断面俯角に対応して、イオンビーム光軸を法線とする面に設定断面俯角を投影した角度情報をもとに上記偏向器を制御し、試料位置制御装置が試料台の試料台面内の回転を制御する構成とした。これにより、試料回転により任意の加工位置に任意の俯角の断面を形成することが容易となる。

(5) 上記(1)から(4)の試料作製装置において、設定断面の設定断面俯角をイオンビーム光軸を法線とする面に投影した角度情報を、2次粒子検出器による2次粒子情報を表示する表示装置上に表示して設定する構成とした。これにより、オペレータが所望のFIB照射角度に対応する加工設定を視覚的に行うことが可能となる。

(6) 上記(1)、(2)の試料作製装置において、所望断面稜の座標、所望断面法線方向、および大きさのパラメータ、あるいはこれらと等価的なパラメータのうち何れか、またはこれらパラメータの組合せに対応して、イオンビーム光学系制御装置がイオンビーム偏向器を制御し、試料位置制御装置が試料台の試料台面内での回転を制御する構成とした。これにより、オペレータが所望する断面形成パラメータに対応する加工設定を自動化することが可能となる。

(7) 上記(1)から(6)の試料作製装置において、所望断面の所望断面俯角、またはこれと等価なパラメータを設定するための入力装置を有する構成とした。これにより、オペレータが容易に所望断面の俯角を設定することが可能となる。

(8) イオンビームを試料に傾斜方向から照射して、スパッタリング加工により断面を作製する試料作製方法において、試料の観察を所望する断面の俯角を設定する工程と、この俯角に対応してイオンビームの偏向走査領域端を決定して偏向走査領域を設定する工程と、この偏向走査領域をイオンビーム加工する工程から試料を作製することで、イオンビームの偏向制御のみで、ある範囲

の任意の傾斜角度の断面を形成することができる。

(9) 上記(8)の試料作製方法において、所望断面の回転角を取得する工程と、この俯角と所望断面の回転角に対応して試料回転角を決定して、試料台の試料台面内での回転を設定する工程から試料を作製することで、所望の断面位置にある範囲の任意の傾斜角度の断面を形成することができる。

(10) 荷電粒子源から放出される荷電粒子ビームを集束し、走査、偏向する荷電粒子ビーム光学系を用いて、荷電粒子ビーム加工により試料台に保持された試料に試料断面を形成するよう構成した試料作製装置において、荷電粒子ビーム光学系の荷電粒子ビーム光軸と試料台面とのなす角度を固定とし、かつ、試料台の試料台面内での回転により、試料断面の形成を制御してなることを特徴とする試料作製装置を提供する。

(11) 荷電粒子源から放出される荷電粒子ビームを集束し、走査・偏向する荷電粒子ビーム光学系を用いて、荷電粒子ビーム加工により試料台に載置された試料に試料断面を形成する試料作製装置において、荷電粒子ビーム光学系の荷電粒子ビーム光軸と試料表面とのなす角度を固定とし、試料の観察を所望する試料断面を形成するために設定した設定断面の法線方向と試料表面のなす角度に対応して、荷電粒子ビーム光学系の走査、偏向を制御するよう構成したことを特徴とする試料作製装置を提供する。

#### 【0014】

【発明の実施の形態】以下に、本発明の実施例を、図面を参照して説明する。

【0015】(実施例1)図1は、本発明による試料作製装置の一実施例を示す構成ブロック図である。

【0016】試料作製装置は、半導体ウエハや半導体チップ等の試料1を載置する可動で非傾斜の試料台2と、試料1の観察、加工位置を特定するため試料台2の位置を制御する試料位置制御装置3と、試料1の観察位置近傍にイオンビーム4を照射して観察用の穴を成形加工をするイオンビーム光学系5と、試料1の近傍を観察するための電子ビーム6を照射する電子ビーム光学系7と、試料1からの2次粒子(例えば、2次電子等)を検出する2次粒子検出器8を有する。

【0017】イオンビーム光学系5の構成は、以下の通りである。イオンを発生するイオン源9は加速電源10により接地電位に対して加速電圧が印加される。イオン源9のイオン放出が不安定な場合には通電加熱電源11により通電加熱を行い、イオン源9の状態改善をする。イオンの引出し電界を形成する引き出し電極12は、引き出し電源13によりイオン源9に対して引出し電圧が印加される。これにより引き出されたイオンビームは、アパーチャ14によりビーム広がり制限される。このアパーチャ14は、引き出し電極12と同電位である。このアパーチャ14を通過したイオンビームは、集束電

源15により集束電圧を印加された集束レンズ16により集束される。

【0018】集束されたイオンビームは、偏向電源17が印加される偏向器18により、走査、偏向が行われる。偏向電源17は、X方向の偏向を行う電源19、20と、Y方向の偏向を行う電源21、22により構成されており、電源19と20にはそれぞれ絶対値が等しく極性が逆の電位 $V_x/2$ 、 $-V_x/2$ がX方向の対向電極に印加される。電源21と22にもY方向について同様にそれぞれ $V_y/2$ 、 $-V_y/2$ が設定される。偏向されたイオンビームは、対物電源23により対物電圧を印加された対物レンズ24により試料1表面上に集束される。

【0019】上記の加速電源10、引き出し電源13、集束電源15、偏向電源17、対物電源23は、イオンビーム光学系制御装置25により制御される。上記イオンビーム光学系5のイオンビーム光軸は、試料1表面に対して傾斜している。

【0020】また、電子ビーム光学系7は、電子を発生する電子源26と電子ビームを偏向、走査する偏向レンズ27等から構成されている。

【0021】イオンビーム光学系制御装置25、試料位置制御装置3、電子ビーム光学系7を制御する電子ビーム光学系制御装置28、二次電子検出器8の検出情報を表示する表示装置29等は、中央処理装置30により制御される。試料台2、イオンビーム光学系5、電子ビーム光学系7、二次電子検出器8等は真空容器31内に配置される。

【0022】図2は、断面観察のための傾斜したイオンビーム光学系での試料加工例を示すものである。本構成では、イオンビーム光軸35が試料1表面の垂直軸40に対して傾斜しており、傾斜角41を、ここでは $0^\circ$ より大きく $90^\circ$ 未満の角度 $\theta$ とする。37はイオンビーム光軸35を試料表面に投影した光軸投影線である。ここに、加工穴39を形成し、作製された形成断面38を観察することを目的とする。ここで、図2のように形成断面38と試料表面の交線である所望断面稜37が、光軸投影線36と平行であるとする。

【0023】このときイオンビーム加工設定は、図3に示すように、表示装置29中の二次電子像45の上でイオンビーム走査領域46を設定することにより行う。この場合、所望断面稜37は光軸投影線36（二次電子像画面上には実在しない架空の線）と平行となる。

【0024】この場合の試料加工断面を図4に示す。この場合はイオンビーム4は所望断面52に平行に照射され、加工穴39を形成する。ここで、もし、理想加工が実現できれば形成断面が所望断面52と一致するはずであるが、実際はイオンビームフレアの影響やリデポ等があるため、加工テーパ角 $\alpha t$ を有する形成断面51となる。このため、深さに伴い位置ずれが存在し、正確な断

面観察ができない可能性があるため、以下の改善が必要である。

【0025】図5に示すようにイオンビーム55をテーパ角に相当する傾斜角だけ傾斜照射して加工穴54を形成すれば、形成断面56は所望断面52の位置に正しく形成される。即ち設定断面58の設定断面俯角 $\alpha d$ を図4のテーパ角に相当する傾斜角 $\alpha t$ に一致させれば良い。

【0026】この傾斜加工を本非傾斜試料台で実現するためには、図6に示す加工設定を行う。図6(a)でイオンビーム走査領域62の偏向走査領域端61（設定断面稜と一致）が光軸投影線36に対して加工回転角 $\phi 3$ （ここでは角度を $\phi d$ とする）を成すように設定する。ここで、図6(b)のように、二次電子像45の画面表示全体を $\phi d$ 回転させて表示しても良く、この場合は架空の光軸投影線36が $\phi d$ 回転しており、イオンビーム走査領域66とその偏向走査領域端65（設定断面稜と一致）は二次電子像45画面上で図3と同様に垂直に見えるため、オペレータは加工設定が行いやすい。ここで、 $\phi d$ は（数1）で示す計算式により、イオンビーム光学系制御装置25により計算され、自動的に偏向器18の走査を設定する。

【0027】

【数1】

$$\phi d = \arctan \left( \frac{\tan \alpha d}{\sqrt{(\sin \theta)^2 - (\tan \alpha d \times \cos \theta)^2}} \right) \quad \dots (数1)$$

ここで、イオンビーム光軸傾斜角 $\theta$ は装置で決まっているため、設定断面俯角 $\alpha d$ に対して加工設定の回転角 $\phi d$ が一意的に決定される。ここで $-\theta \leq \alpha d \leq \theta$ である。

【0028】このときの加工を表したのが図7であり、加工穴72の設定断面稜71が光軸投影線36と角度74（ここでは設定断面稜回転角 $\beta d$ とする）ずれている。この $\beta d$ は（数2）で表される。

【0029】

【数2】

$$\beta d = \arcsin \left( \frac{\tan \alpha d}{\tan \theta} \right) \quad \dots (数2)$$

この $\beta d$ と $\phi d$ の関係は（数3）のように簡単に表される。

【0030】

【数3】

$$\beta d = \arctan (\cos \theta \times \tan \phi d) \quad \dots (数3)$$

即ち、図8(a)に示すように、加工回転角 $\phi d$ が $0^\circ$ の場合の二次電子像である図3において、断面加工する構造方向81が光軸投影線36と平行な状態を試料台3の回転基準（ここでは $0^\circ$ とする）としたときは、図8

(b)に示すように試料台を $\beta d$ 回転させれば設定断面稜71が断面加工する構造方向81と一致し、所望の観察断面作製が可能となる。

【0031】つまり、上記の通り、加工回転角 $\phi d$ は設定断面俯角 $\alpha d$ で決定されるため、設定断面稜回転角 $\beta d$ から決定される試料台回転角 $\beta r$ も設定断面俯角 $\alpha d$ に対して一意的に決まる。このため、(数2)計算を試料位置制御装置18により行うことで、断面加工する構造方向に対して試料台回転を自動制御することが可能となる。

【0032】以上の設定のフローをブロック図で表現すると図9に示す通りとなる。まず、設定断面俯角 $\alpha d$ がユーザにより入力される(91)。これは、例えば図10(a)に示すとおり表示装置29画面上の設定断面俯角設定部101に入力することで、中央処理装置30を介してイオンビーム光学系制御装置25に伝達される。

【0033】次に、所望断面稜をユーザが設定する(93)。これは、例えば図10に示すとおり二次電子像45画面上で所望断面稜102の始点( $X_s, Y_s$ )103と終点( $X_e, Y_e$ )104を指定することで設定される。この目標とする位置はデバイス設計のCAD(Computer-Aided Design)データから位置設定する事も可能であり、この場合には試料の最表面に無い下層配線位置を設定する事も可能である。このCADデータでは所望断面稜設定93において、座標情報として数値的に所望断面稜102の始点( $X_s, Y_s$ )103と終点( $X_e, Y_e$ )104を設定することも可能である。図10の矢印105は所望断面稜法線方向を表し、この矢印方向に、イオンビーム加工穴を形成する。

【0034】これらの情報を元に、まず、イオンビーム走査範囲を決定する。ここでは、図6(b)で説明したように二次電子像取込用のイオンビーム走査自身を回転させる場合について説明する。まず、(数1)により加工回転角 $\phi d$ を算出する(92)。この加工回転角 $\phi d$ 分のイオンビーム走査回転を行うことで、イオンビーム走

査回転を行う前の偏向座標( $X_i, Y_j$ )が(数4)、(数5)で表される( $X_{ij}, Y_{ij}$ )に変換される。

【0035】

【数4】

$$X_{ij} = X_i \cos \phi_d + Y_i \sin \phi_d \quad \dots (数4)$$

【数5】

ここで、 $Y_{ij} = -X_i \sin \phi_d + Y_i \cos \phi_d \quad \dots (数5)$   
イオンビーム走査領域を定義する( $i = 1 \sim n, j = 1 \sim m$ )は、所望断面稜設定( $X_s, Y_s$ )、( $X_e, Y_e$ )と所望断面深さ $Z_d$ から決定する(95)。この所望断面深さ $Z_d$ 設定(94)は、例えば図10(a)の示すとおり表示装置29画面上の所望断面深さ設定部106に入力することで、中央処理装置30を介してイオンビーム光学系制御装置25に伝達される。( $i = 1 \sim n, j = 1 \sim m$ )は所望断面稜の長さから決まる加工穴長さ、断面観察角度と所望断面深さ $Z_d$ から決まる加工穴幅から決定される。この( $X_{ij}, Y_{ij}$ )に対応する偏向電圧を(数6)、(数7)により算出する(96)。

【0036】

【数6】

$$V_{xij} = k_x \times X_{ij} \quad \dots (数6)$$

【数7】

$$V_{yij} = k_y \times Y_{ij} \quad \dots (数7)$$

ここで、 $k_x, k_y$ はそれぞれX、Y方向の偏向の係数で、加速電圧10、偏向器18の長さ、対向電極間距離、偏向器18から試料1までの距離等により装置的に決定される係数である。この( $V_{xij}, V_{yij}$ )を偏向電源17から印加し、偏向器18の電圧制御を行う。このとき、設定断面稜は、図6(b)の65で示す通り、二次電子像36上で垂直となる。この設定断面稜65に所望断面稜102を試料台2の回転により一致させるために必要な試料台回転角 $\beta r$ は、(数8)により試料位置制御装置3で算出され、試料台2が回転制御される。

【0037】

【数8】

$$\beta_r = \arctan(\cos \theta \times \tan \phi_d) - \arctan\left(\cos \theta \times \frac{X_s - X_e}{Y_s - Y_e}\right) \quad \dots (数8)$$

このとき、二次電子像45上には、図10(b)に示すように、所望断面稜107に対して、イオンビーム走査領域108が( $X_{11}, Y_{11}$ )109、( $X_{1m}, Y_{1m}$ )110、( $X_{n1}, Y_{n1}$ )111、( $X_{nm}, Y_{nm}$ )112に囲まれた領域として設定されている。この領域をイオンビーム走査して加工を行うことで、所望断面が形成される。

【0038】もし、イオンビームのフレアによる加工誤差を有し問題となる場合は、( $X_{11}, Y_{11}$ )109と( $X_{1m}, Y_{1m}$ )110を結ぶ線分で形成される偏向走査領域端を、所望断面107から誤差分だけ図10(b)中で右

方向に移動して設定すると形成断面が所望断面107となる。

【0039】ここで、イオンビーム光軸傾斜角 $\theta$ が $45^\circ$ の場合の実際の加工例を示す。(表1)は、 $-45^\circ \sim +45^\circ$ の設定断面俯角 $\alpha d$ に対する加工回転角 $\phi d$ と設定断面稜回転角 $\beta d$ を(数1)、(数2)の計算から求めた設定値(degree単位で小数第1位まで記載)である。

【0040】(表1)

設定断面俯角 $\alpha_d$ (度)	加工回転角 $\phi_d$ (度)	設定断面稜回転角 $\beta_d$ (度)
-45	-90	-90
-40	-65.4	-57.0
-30	-45	-35.3
-20	-28.9	-21.3
-10	-14.2	-10.2
0	0	0
10	14.2	10.2
20	28.9	21.3
30	45	35.3
40	65.4	57.0
45	90	90

【0041】これら条件で加工したときの、実際の形成断面の形成断面俯角と設定断面俯角  $\alpha_d$  の関係を図14に示す。加工が理想的であれば実験値141は理想線142と一致するはずであるが、実際には一致していない。このズレは加工テーパが原因である。このため、正確な所望断面を形成するためには、テーパ角  $\alpha_t$  を自動的に補正する、以下のようなフローが必要である。

【0042】テーパ角  $\alpha_t$  は、イオンビームエネルギーや試料材質等に依存するのみならず、イオンビームの光軸傾斜角  $\theta$  や所望断面俯角  $\alpha_e$  にも依存する。このため、テーパ角を  $\alpha_t(\alpha_e, \theta)$  と表現すると、以下の(数9)で表される設定断面俯角  $\alpha_d$  を使用して、(数1)の  $\phi_d$  を偏向制御し、(数8)の  $\beta_r$  を試料台回転制御することで形成断面を所望断面と一致させることができる。

【0043】

【数9】

$$\alpha_d = \alpha_e + \alpha_t(\alpha_e, \theta) \quad \dots (数9)$$

即ち、テーパ角  $\alpha_t(\alpha_e, \theta)$  の  $\alpha_e, \theta$  をパラメータとしたテーブルを使用することで、自動的に形成断面を所望断面位置に作製することができる。  $\theta$  が  $45^\circ$  の時は、このテーブルは例えば(表2)のようになる。

【0044】(表2)

所望断面俯角 $\alpha_e$ (度)	テーパ角 $\alpha_t$ (度)
-45	3.4
-40	3.8
-30	4.6
-20	5.4
-10	6.2
0	7.0
10	7.7
20	8.5
30	9.3
40	10.1
45	10.5

【0045】以上のように、本発明の構成により、加工設定の回転角  $\phi_d$  と試料台回転角  $\beta_r$  を自動制御することで、イオンビームの傾斜照射角  $\alpha_d$  を任意に選ぶことができ、テーパ除去加工等も容易となる。

【0046】(実施例2) 本実施例では、断面作製のために実際に加工される形状を矩形とする例について説明する。

【0047】実施例1で説明したイオンビーム走査領域は図6のように矩形であるため、実際に試料表面上で加工される形状は、図15(a)の151に示す通り平行四辺形となる。ここで、153、154、155はデバイスの配線であり、このうち配線153、154の位置を加工することを目的とする。形成断面稜152は配線153、154と垂直に交差するように加工されている。この場合、形成断面稜以外の加工稜156は形成断面稜152に対して斜めに形成され、本来加工する必要

が無い配線155まで加工してしまうことがある。

【0048】このため、図15(b)に示すような加工が望まれる場合がある。即ち、試料表面上での加工形状が157のように矩形にし、形成断面稜158以外の加工稜159を配線153等と平行にすることで、目標配線153、154のみを加工することが可能となる。

【0049】この加工を実現するためには、図16に示す加工設定を行えば良い。これは、図6(b)に対応する図であり、二次電子像161の画面表示全体を $\phi d$ 回転させて表示したものである。ここで、偏向走査領域端163は図6(b)の偏向走査領域端65と同様に設定するが、この偏向走査領域162は図6(b)の矩形の偏向走査領域66と異なり、平行四辺形に設定する。このとき164に示す平行四辺形の内角 $\gamma$ (degree表示)は、(数10)で表される。

【0050】

【数10】

$$\gamma = 90 - \phi + \arctan\left\{(\cos\theta)^2 \times \tan\phi\right\} \quad \dots (数10)$$

以上のように、平行四辺形の偏向走査領域162の設定で加工することにより、図15(b)の矩形加工が実現できるため、無駄な領域を加工することなく任意傾斜加工を実現することができる。

【0051】(実施例3)本実施例では、本発明による試料作製装置を、TEM観察やエネルギー分散型X線分光分析法(EDX)や電子エネルギー損失分光法(EELS)の薄膜試料に適用した例について説明する。

【0052】TEM観察用薄膜は、観察分解能を向上するためには薄いことが要求され、通常100nm程度の厚さに加工する。しかし、実施例1で述べたように観察断面に対してイオンビームを平行に照射する場合には、TEM薄膜加工では、図11に示す様にテーパを有する薄膜断面115、116ができてしまうため所望観察面117に対して深さ方向に厚さ分布を持つ試料となる。この場合は、深い領域では余分な構造まで含んでしまい、観察精度が劣化する。さらに、組成元素分析のためにEDXやEELSを使用する場合には、X線や電子線の信号量の定量性が重要であるが、膜厚が異なる図11のような試料の場合には、組成の定量的比較ができなくなる。

【0053】これを解決するためには、実施例1で説明したようにイオンビームの加工設定の回転角 $\phi d$ をイオンビーム光学系制御装置25で制御し、図12(a)に示すとおり、イオンビーム121が所望観察面117に対して傾斜させて照射することにより、薄膜断面122を所望観察面117に平行に形成することができる。同様に逆方向にイオンビームの加工設定の回転角 $\phi d$ を設定することで、図12(b)に示す傾斜イオンビーム124の照射が可能になり、薄膜断面125を形成できる。これにより、膜厚均一性の高い観察薄膜を形成する

ことが可能となる。

【0054】以上のように、本発明の構成により、加工設定の回転角 $\phi d$ と試料台回転角 $\beta r$ を自動制御することで、イオンビームの傾斜照射角 $\alpha d$ を任意に選ぶことができ、膜厚均一性の高い薄膜が形成でき、TEM観察の観察精度の向上やEDX、EELSの分析定量化に有効である。

【0055】(実施例4)本実施例では、本発明による試料作製装置を、オージェ電子分光分析(AES)や二次イオン質量分析(SIMS)の深さ分析用試料に適用した例について説明する。

【0056】AESやSIMSで試料表面平行方向に組成が均一な試料部の深さ方向の組成分析をする場合、深さ方向分解能を向上するために浅い角度で形成した断面を分析することで深さ分解能を向上させることができる。このような分析に適した分析断面作製法について図13(a)に示す。

【0057】イオンビーム131は、実施例1で説明したイオンビーム偏向制御により傾斜照射を行い加工穴133を形成する。こうして形成断面132を形成することにより断面に露出する試料内部構造は試料深さ方向よりも広くなる。この形成断面132に電子ビーム134を照射し、オージェ電子を検出して分光して、形成断面132内の面内組成分布を取得することにより、試料1の深さ方向の組成分布を得ることができる。電子ビーム134の代わりにイオンビームを照射し、二次イオンを検出して質量分析すれば、SIMSによる深さ方向の元素分析にも使用可能である。

【0058】このように本試料作製装置により浅い角度の傾斜断面を形成することにより、AES、SIMS等の組成深さ分析の分解能を向上させることも可能となる。

【0059】なお、以上の実施例では、イオンビームによる加工を例にとって説明してきたが、本発明は、イオンビームに限らず加工可能な荷電粒子線ビームであれば適用可能である。

【0060】

【発明の効果】本発明によれば、装置製造コストの低減に有効な非傾斜試料台による装置構成で、任意の角度でのイオンビーム照射加工が可能となり、精度良い断面が形成できるため、FIBやSEM観察が高精度化される。また、膜厚均一性の高い試料薄膜が形成でき、TEM観察の観察精度の向上やEDX、EELSの分析定量化に有効である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による試料作製装置の一実施例を示す全体構成図。

【図2】斜め方向からのイオンビーム照射による断面加工例を示す図。

【図3】二次電子像上での断面加工設定画面を示す図。



【図4】所望断面に対するイオンビーム平行照射での形成断面を示す図。

【図5】所望断面に対するイオンビーム傾斜照射での形成断面を示す図。

【図6】イオンビーム傾斜照射時の二次電子像上での断面加工設定画面を示す図。

【図7】イオンビーム傾斜照射時の断面加工を示す図。

【図8】断面加工する構造を加工設定と一致させる試料回転を示す図。

【図9】本発明における加工設定のフローを示すブロック図。

【図10】加工設定画面を示す図

【図11】所望断面に対するイオンビーム平行照射での薄膜加工を示す図。

【図12】所望断面に対するイオンビーム傾斜照射での薄膜加工を示す図。

【図13】深さ方向組成分析に適した試料断面形成加工を示す図。

【図14】実験による設定断面俯角と形成断面俯角の関係を示す図。

【図15】試料表面加工形状によるデバイスパターン加工の違いを示す図。

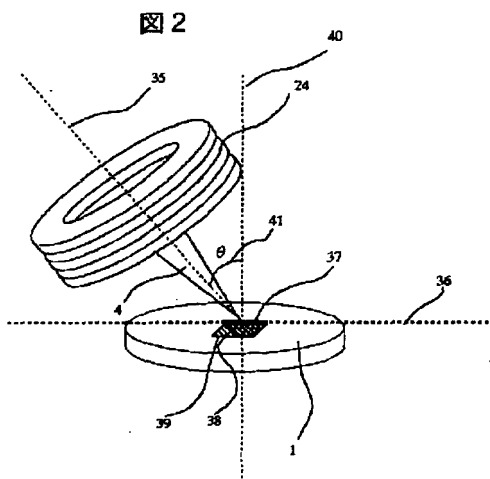
【図16】矩形穴加工のための偏向走査領域を示す図。

【符号の説明】

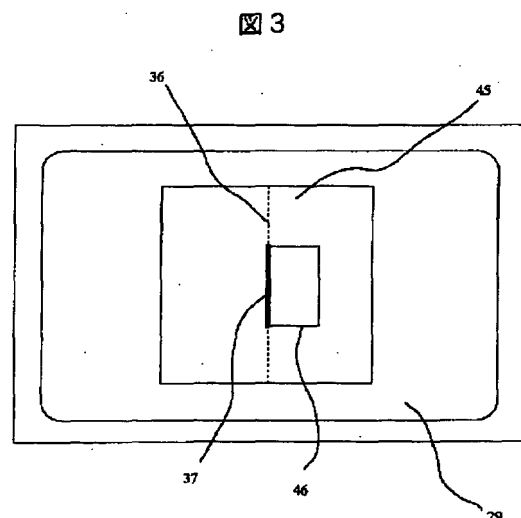
1…試料、2…試料台、3…試料位置制御装置、4…イオンビーム、5…イオンビーム光学系、6…電子ビーム、7…電子ビーム光学系、8…二次電子検出器、9…イオン源、10…加速電源、11…通電加熱電源、12

…引き出し電極、13…引き出し電源、14…アパーチャ、15…集束電源、16…集束レンズ、17…偏向電源、18…偏向器、23…対物電源、24…対物レンズ、25…イオンビーム光学系制御装置、26…電子源、27…偏向レンズ、28…電子ビーム光学系制御装置、29…表示装置、30…中央処理装置、31…真空容器、35…イオンビーム光軸、36…光軸投影線、37…所望断面稜、38…形成断面、39…加工穴、40…試料表面の垂直軸、41…傾斜角、45…二次電子像、46…イオンビーム走査領域、51…形成断面、52…所望断面、55…イオンビーム、56…形成断面、57…加工穴、58…設定断面、61…設定断面稜、62…イオンビーム走査領域、63…加工回転角、65…設定断面稜、66…イオンビーム走査領域、71…設定断面稜、72…加工穴、73…形成断面、74…設定断面稜回転角、81…断面加工する構造方向、101…設定断面俯角設定部、102…所望断面稜、105…矢印、106…所望断面深さ設定部、107…所望断面稜、108…イオンビーム走査領域、115、116…薄膜断面、117…所望観察面、121…イオンビーム、122、123…薄膜断面、124…イオンビーム、125…薄膜断面、131…イオンビーム、132…形成断面、133…加工穴、134…電子ビーム、141…実験値、142…理想線、151…加工形状、152…形成断面稜、153、154、155…配線、156…加工稜、157…加工形状、158…形成断面稜、159…加工稜、161…二次電子像、162…偏向走査領域、163…偏向走査領域端、164…内角。

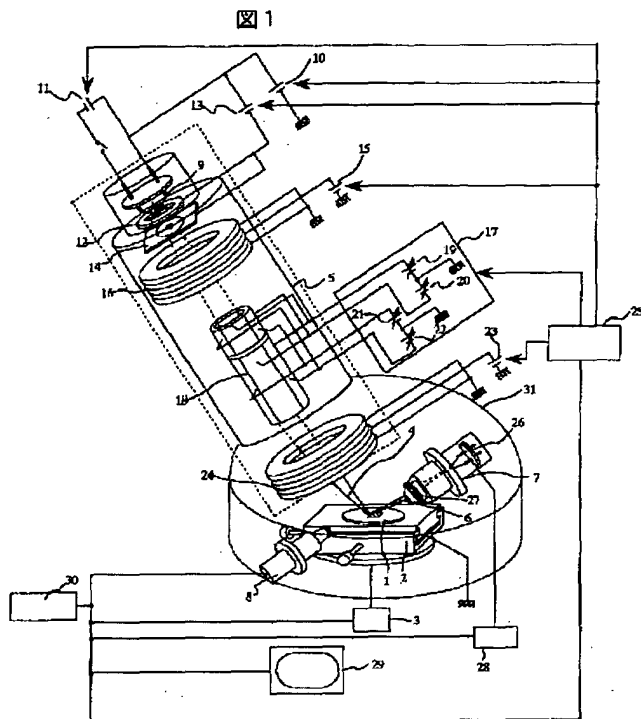
【図2】



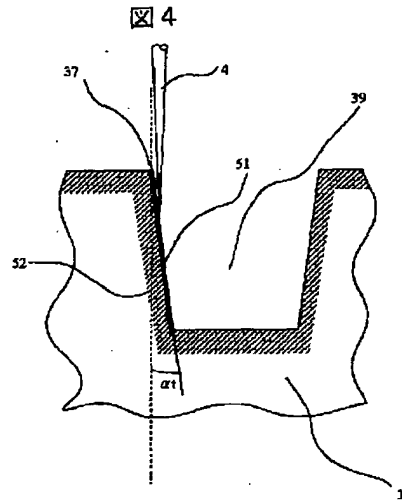
【図3】



【図1】

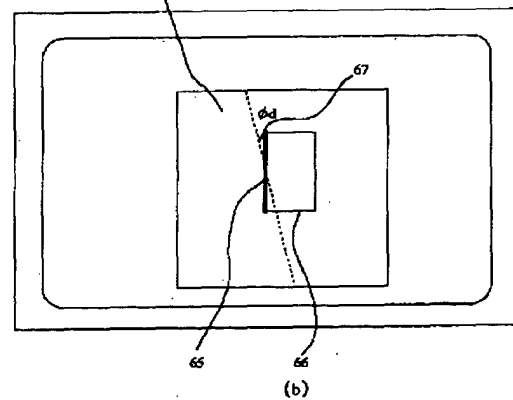
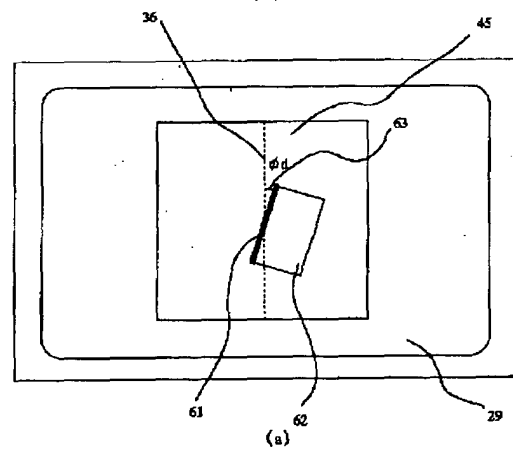


【図4】



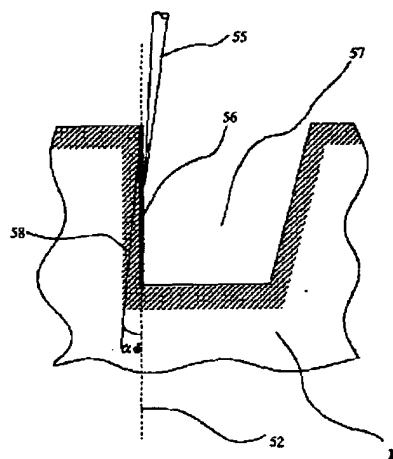
【図6】

図6

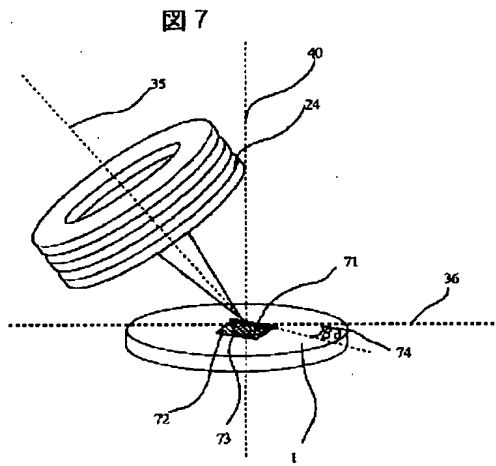


【図5】

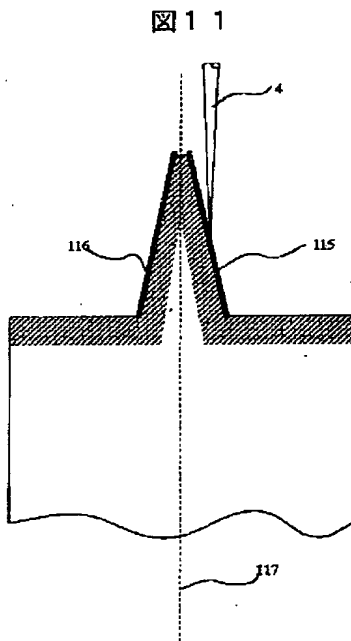
図5



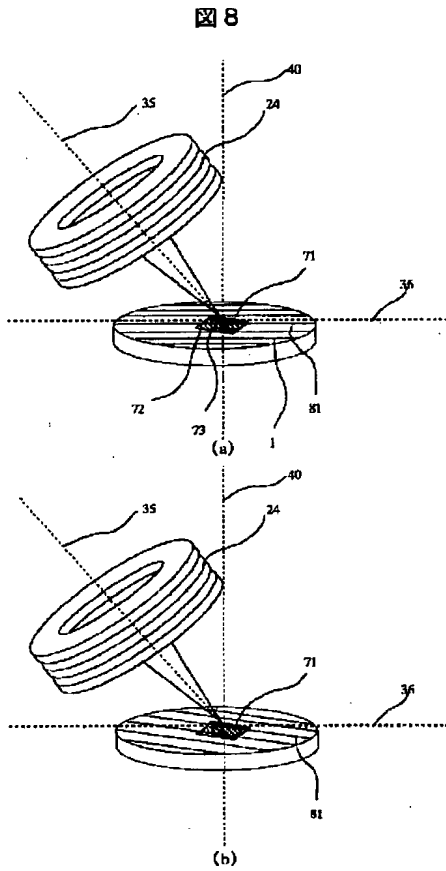
【図7】



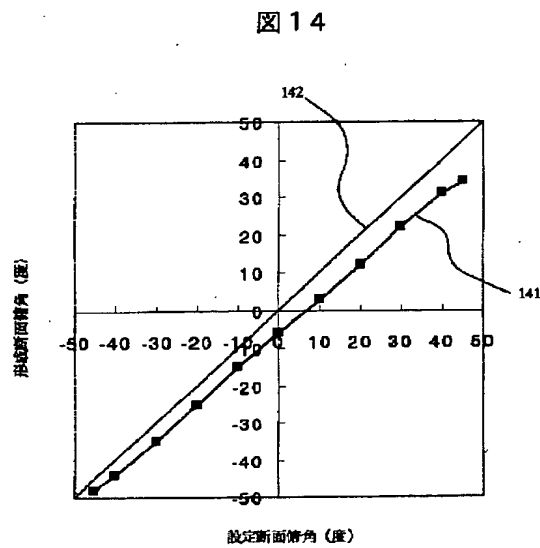
【図11】



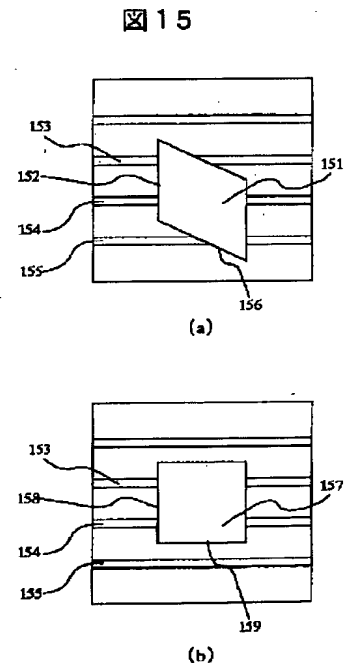
【図8】



【図14】

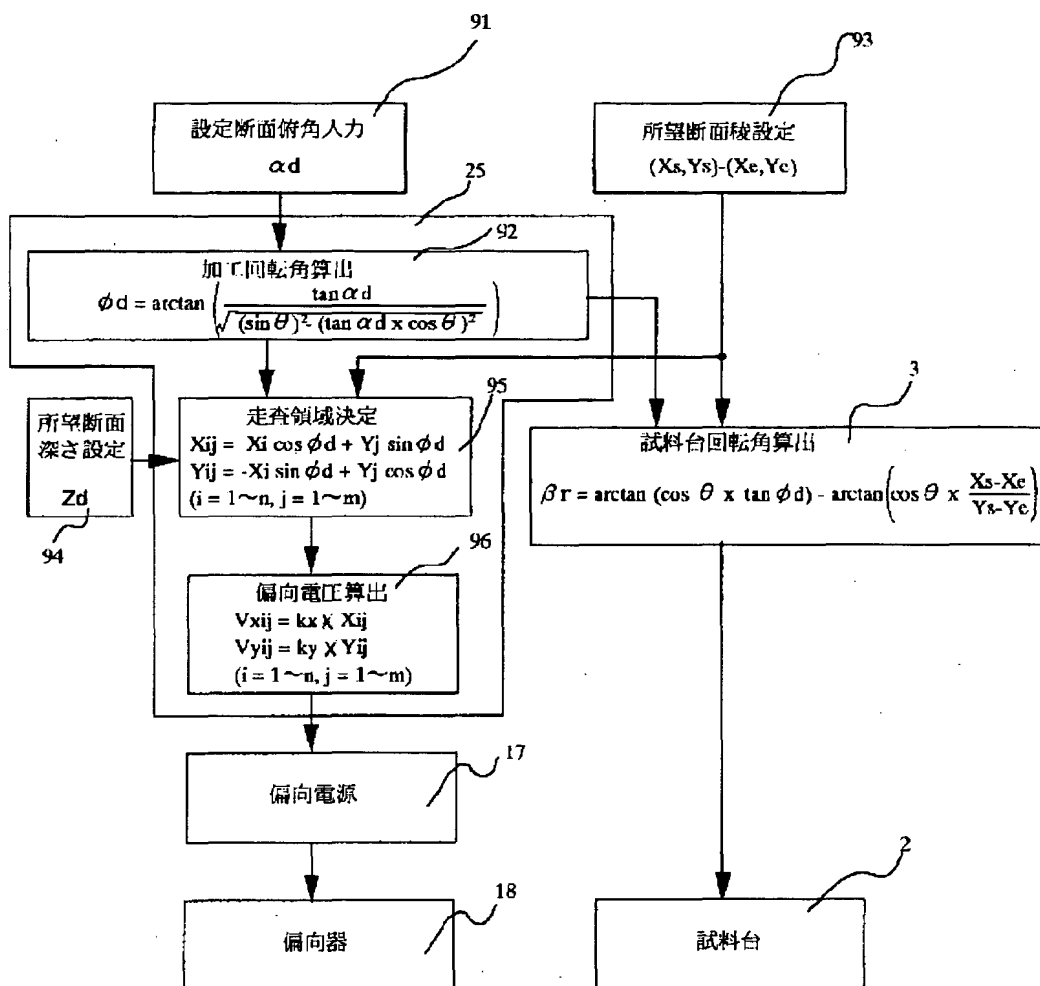


【図15】

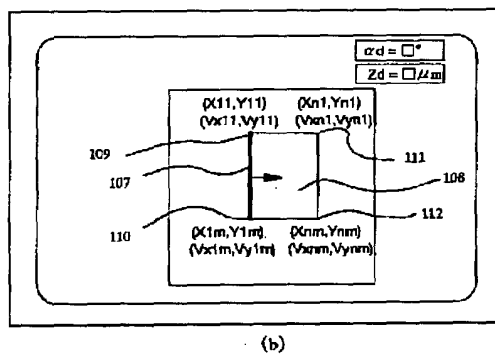
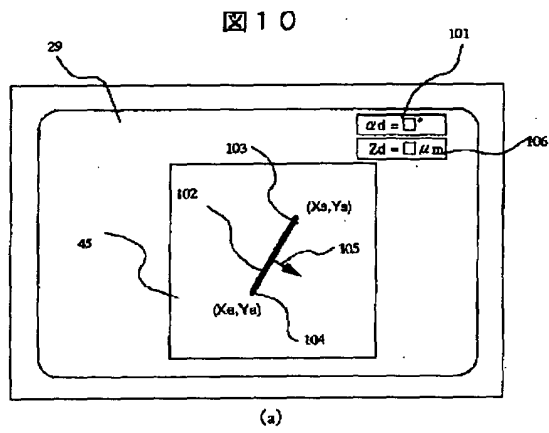


【図9】

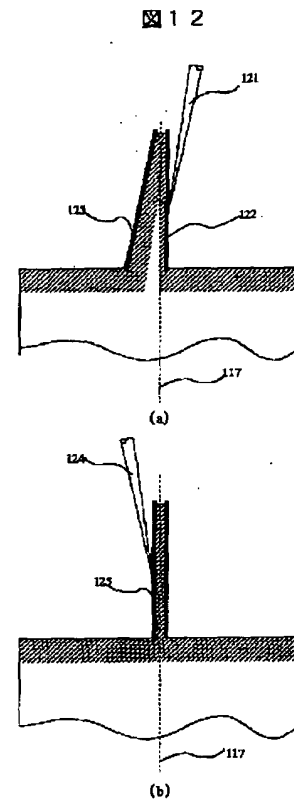
図9



【図10】

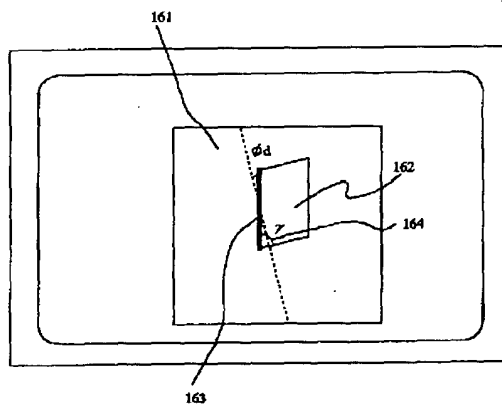


【図12】



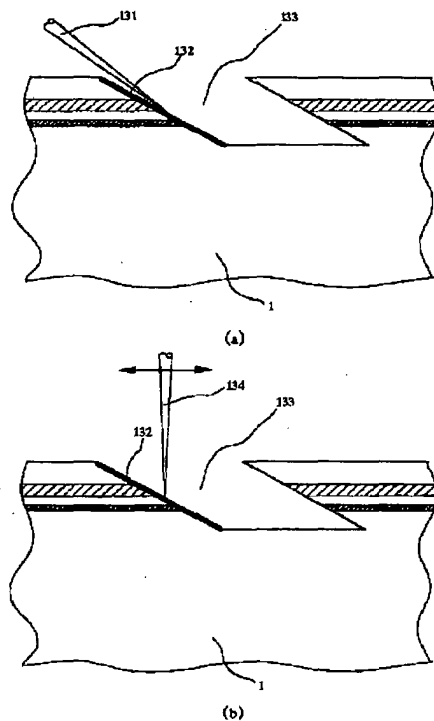
【図16】

図16



【図13】

図13



フロントページの続き

(72)発明者 石谷 亨  
茨城県ひたちなか市市毛882番地 株式会  
社日立製作所計測器グループ内  
(72)発明者 志知 広康  
東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地  
株式会社日立製作所中央研究所内  
(72)発明者 鹿島 秀夫  
東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地  
株式会社日立製作所中央研究所内

(72)発明者 福田 宗行  
東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地  
株式会社日立製作所中央研究所内  
F ターム(参考) 2G052 AA13 AB00 AC28 AD32 AD52  
BA02 EC18 FD11 GA33 HC04  
HC06 JA01 JA09  
5C034 AA02 AB03 AB04 BB04 BB06  
BB07